

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO₂ 特征分析 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM_{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水质光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苾的降解 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应

黄昭露, 陈泉源*, 周娟, 谢墨函

(东华大学环境科学与工程学院, 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620)

摘要: 采用表面活性剂清洗煤油污染土壤, 考察添加钠盐对洗脱率的影响, 并用 Zeta 电位仪、表面张力仪对溶液及用接触角仪对清洗前后的土壤进行表征。结果表明, 硅酸钠对十二烷基硫酸钠(SDS)清洗的增效作用最明显; 酒石酸钠对十二烷基苯磺酸钠(SDBS)及聚氧乙烯月桂醚(Brij35)清洗的增效作用最明显; 不同类型钠盐对曲拉通 X-100(TX-100)清洗均有一定的增效作用但差别不明显; 腐殖酸钠及硅酸钠对皂苷溶液清洗的增效程度相当, 但就改良土质而言选用腐殖酸钠作助剂更为合适; 硅酸钠对 Tw-80 清洗的增效作用随着 Tw-80 浓度的增大而增强, 氯化钠和酒石酸钠则相反。钠盐增效清洗的作用机制是降低离子型表面活性剂的表面张力和临界胶束浓度; 而非离子型表面活性剂的增效作用则是利用钠盐防止煤油“重吸附”及抗表面活性剂“沉淀”, 增大胶团体积来实现。接触角测量表明, 煤油污染后的土壤亲水性减弱, 清洗后接触角变小, 亲水性增强, 且随着表面活性剂浓度的增大接触角减小, 对恢复土壤运输水分和养料正常功能有利。

关键词: 煤油; 表面活性剂; 洗脱率; 钠盐; 表面张力

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1849-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.046

Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants

HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan*, ZHOU Juan, XIE Mo-han

(State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The impact of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with surfactants was investigated. The results indicated that sodium silicate greatly enhanced the washing efficiency of SDS. Sodium tartrate can largely enhance the washing efficiency of SDBS and Brij35. Sodium salts can enhance the washing efficiency on kerosene contaminated with TX-100. No significant differences were observed between different sodium salts. Sodium salt of humic acid and sodium silicate had similar enhancement on kerosene contaminated soil washing with saponin. Sodium humate can be a better choice since its application can also improve soil quality. The enhancement of sodium silicate on kerosene contaminated soil washing with Tw-80 increased with the increase of Tw-80 dosage. However, the impact of sodium chloride and sodium tartrate was opposite to sodium silicate. Sodium salts can reduce surface tension and critical micelle concentration of ionic surfactants to enhance the washing. Sodium salts can also reduce re-adsorption of oil to soil with nonionic surfactants to enhance the washing. Kerosene contamination can increase the contact angle of soil, which indicated the increase of hydrophilicity of soil. Washing with surfactants can reduce the hydrophilicity of soil according to contact angle measurement, which indicated that kerosene contaminated soil remediation with surfactant can also benefit nutrient and water transportation in the contaminated soil.

Key words: kerosene; surfactant; elution percentage; sodium salt; surface tension

煤油是常见的化工产品之一, 被广泛用于航空燃料、工业溶剂、器械清洗和生活照明。人类的各项生产活动使煤油被大量释放到环境中^[1], 引起不同程度的土壤污染^[2~5], 并通过食物链富集的方式对人体和其它生物造成危害^[6,7], 且有“三致”风险。煤油的憎水性强, 在土壤表面吸附牢固, 且难以被微生物降解, 导致土壤结构和功能的破坏, 煤油的迁移转化还会引起地下水的污染^[8]。毒性研究表明, 煤油的吸入会导致神经衰弱, 降低人体免疫力, 引起肺部及支气管病变^[9~12]。

对于土壤有机污染修复, 传统的处理方法有焚烧法、电修复法、抽气法^[13,14]、通气法^[15]、萃取法

等, 这些方法都存在能耗较大等问题^[6]。采用表面活性剂洗涤的方法来修复污染土壤, 具有能耗较低、处理周期短、操作简便且可回收油类的优点^[12,16,17]。由于表面活性剂具有“两亲”性质, 能通过胶束的分配作用和改变界面张力显著增加疏水性有机物在水中的溶解度^[18~20], 利用表面活性剂对有机污染物的增溶作用, 能将有机污染物从土壤中解吸出来, 并能改善土壤环境及有机物的生物可利用

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277023)

作者简介: 黄昭露(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复与防治, E-mail: hzlu1221@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: qychen@dhu.edu.cn

性^[10,21-23].

在表面活性剂溶液中,表面活性剂的单个分子或离子开始聚集并缔合成胶束时的浓度,为临界胶束浓度(CMC).在该浓度下表面活性剂溶液的性质发生急剧转变,表面张力降至最低^[24].研究证明,盐能降低油/水的界面张力,以及增加乳状液的稳定性,并能通过“盐溶”和“盐析”作用影响表面活性剂的CMC^[25,26].其中,钠盐还能起到“抗沉淀”的作用,防止表面活性剂向土壤相吸附造成有效性降低且导致土壤二次污染,防止土壤相对洗脱煤油“重吸附”,并能促进表面活性剂形成胶束,加强对疏水性有机物的包覆作用,从而提高油的洗脱率^[27,28].如卢媛等^[26]使用表面活性剂对污染土壤进行清洗处理时,加入硅酸钠助剂可将污染物洗脱率从35%提高到76.87%.梁莹等^[27]研究了表面活性剂和腐殖酸钠去除黄土中柴油类污染物,认为腐殖酸钠能有效“增溶”,加入碳酸钠和硅酸钠均能较大幅度地提高油洗脱率,但盐的浓度不能超过 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

通过添加不同类型的钠盐强化对煤油污染土壤的清洗效果,测定添加钠盐前后溶液的表面张力和污染土壤清洗前后的接触角,研究清洗修复煤油污染土壤的影响因素和作用机制,以期在保证清洗效果前提下减少表面活性剂的用量以降低修复成本提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验仪器和试剂

实验所用仪器有 Zeta-Meter System 3.0 + 电位仪(荷兰安米德有限公司)、全自动表面张力仪 ZBY-1 型(上海衡平仪器仪表厂)、SL200C 接触角仪(上海梭伦信息科技有限公司).

本实验所用表面活性剂分为离子型和非离子型,离子型表面活性剂具有来源广泛、价格低廉、毒性低、不易在土壤中沉淀的优点,如 SDS 和 SDBS;非离子型表面活性剂具有价格低廉、临界胶束浓度低、毒性低的优点,如 TX-100、Tw-80、Brij35;生物表面活性剂属于非离子型,具有对环境友好、易降解和无二次污染的优点,近年来在污染土壤生化修复中得到广泛关注和研究使用^[29],本实验选用的皂苷为生物表面活性剂.除传统的助剂硅酸钠外,研究酒石酸钠、氯化钠及腐殖酸钠等助剂的强化增效作用.

实验所用表面活性剂:十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、十二烷基硫酸钠(SDS)、曲拉通 X-100(TX-100)、皂苷(saponin)、聚氧乙烯月桂醚(Brij35)、吐温-80(Tw-80)、硅酸钠、氯化钠、酒石酸钠、腐殖酸钠,均为分析纯,所用的表面活性剂的性质如表 1 所示.

表 1 实验用表面活性剂性质

Table 1 Properties of surfactants used in experiments

试剂名称	试剂属性	CMC/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
聚氧乙烯月桂醚(Brij35)	$\text{C}_2(\text{H}_4\text{O})_n\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ F. W. 30 152 387	0.66×10^{-2}
吐温-80(Tw-80)	$\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$ 相对分子质量 428. 60	0.14×10^{-1}
皂苷(saponin)	CAS. NO[8047-15-2]	0. 14
曲拉通 X-100(TX-100)	OP 乳化剂 CP $\text{C}_{34}\text{H}_{62}\text{O}_{11}$ 相对分子质量 646. 86	0. 17
十二烷基苯磺酸钠(SDBS)	$\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$ 相对分子质量 348. 48	0. 38
十二烷基硫酸钠(SDS)	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$ 相对分子质量 288. 38	2. 50

1.2 土壤及煤油

实验所用土壤取自于东华大学未受煤油污染的绿化带次表层^[30](土壤表面以下 5 ~ 20cm),取回后置于烘箱中 65°C 烘干至恒重,破碎后过 20 目筛,分装存于干燥处备用.所用土壤的性质:相对密度为 $2.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,干燥后含水率为 0.99%,有机质含量为 2.48%,砂粒含量 15.74%,黏粒的含量 4.51%,粉粒的含量 76.28%,土壤 pH 值为 7.28,CEC 值为 $93.7 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

实验用煤油为航空煤油,理化性质如表 2.

表 2 实验用煤油的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of kerosene used in experiments

名称	指标
含碳原子数	11 ~ 16
沸点范围/ $^\circ\text{C}$	180 ~ 310
烷烃/%	34. 0
不饱和烃/%	4
芳烃/%	21
环烃/%	40. 9
含硫量/%	0. 1
柴油指数	74. 3
平均相对分子质量	210. 89

1.3 污染土壤的制备

污染土壤的制备方法: 取适量煤油与土壤进行混合, 用玻璃棒充分搅拌后密封置于冰箱中. 实验前对受试土壤采用重量法^[31,32]进行煤油含量的测定. 具体过程为: 准确称取煤油污染土样 15 g, 用氯仿热浸 3 次, 将滤液滤入已称重的烧杯中, 在 50 ~ 55℃ 水浴上风干, 再将烧杯移入 60 ~ 70℃ 烘箱中加热 4 h, 取出后干燥, 冷却 0.5 h, 称重, 计算含油率. 本文实验中污染土壤实测含油率为 20%.

1.4 实验方法

1.4.1 污染土壤的清洗

将 6 种表面活性剂配制成水溶液, 每个样取用 2 g 的污染土壤进行搅拌清洗, 液/固体积比为 25:1, 添加的钠盐量为 0.004 g, 搅拌温度为 25℃, 以 300 r·min⁻¹^[17] 的频率搅拌 15 min, 将混合液进行抽滤, 所得滤饼以重量法^[31,32]进行含油率的测定, 求得洗脱率.

1.4.2 表面张力的测定

表面张力测定采用“白金板吊片法”, 取用 SDBS、Tw-80 及皂苷这 3 种溶液 0.7、1、1.5、2、2.5、3 倍临界胶束浓度 (CMC), 分别对添加等量 (0.004 g) 氯化钠、硅酸钠、酒石酸钠、腐殖酸钠后的混合液测定表面张力, 其值由表面张力仪读出.

1.4.3 接触角的测定

用 6 个浓度下 Tw-80 清洗后的土壤进行接触角的测定, 确定其亲水性的变化. 土壤接触角的测定采用“滴停法”, 仪器可直接读数. 测定前需对土壤进行“压片”处理, 重复 3 次取平均值.

2 结果与讨论

在相同条件下, 用 6 种不同的表面活性剂进行土壤清洗实验, 保持清洗的液/固比为 25:1, 清洗温度 25℃, 以 300 r·min⁻¹ 转速搅拌 15 min, 液、固分离, 固体部分用重量法测定并计算煤油的洗脱率, 实验结果如图 1 所示. 在相同的浓度条件 (以 CMC 倍数衡量) 下, SDS 的效果最好, 但其 CMC 亦最高; SDBS 次之; Brij35 虽然效果最差, 但是 CMC 仅为 SDS 的 0.03 倍, 为 6 种表面活性剂最低. 皂苷的效果介于中间, 作为一种常用的高性价比生物型表面活性剂, 具有环境兼容性、易降解、不产生二次污染的优点^[33-35], 是理想的清洗剂. 皂苷在生物表面活性剂中价格较低, 但仍高于化学表面活性剂, 故添加微量钠盐强化增效, 降低皂苷用量以降低修复成本具有实际意义.

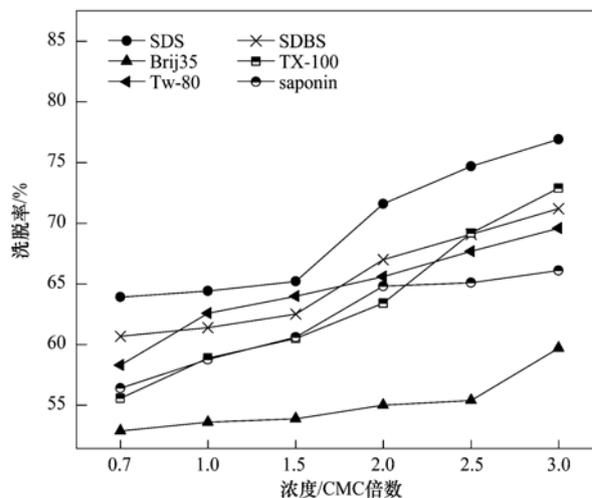


图 1 6 种不同表面活性剂的清洗效果

Fig. 1 Washing the kerosene contaminated soil with different surfactants with the same concentration

2.1 钠盐对离子表面活性剂清洗的增效作用

2.1.1 钠盐对 SDS 清洗的增效作用

图 2 显示, 钠盐对 SDS 清洗煤油污染土壤的强化增效作用明显. 硅酸钠的增效作用最大; 氯化钠和腐殖酸钠的效果相当; 酒石酸钠的增效作用不明显. 盐离子可以使表面活性剂胶团聚集数增多, 增加煤油在胶团中的溶解度. 钠离子的加入会压缩聚集体的扩散双电层, 减弱表面活性剂“离子头”间的排斥作用, 使更多的表面活性剂粒子进入胶团而不增加体系的自由能, 聚集成较大的胶团^[36], 以提供更大的空间对油污进行“包覆”, 并增加煤油在水中的溶解度, 将其带离土壤相. 利用“增溶”作用提高土壤污染物的洗脱率, 从而改善修复效果^[34].

2.1.2 钠盐对 SDBS 清洗的增效作用

十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 为另一常用的离子型表面活性剂, 其 CMC 值低于 SDS. 图 3 显示, 钠盐对 SDBS 清洗的增效作用较为明显, 硅酸钠对 SDBS 清洗有很好的“助溶”增效作用, 归因于对扩散双电层的压缩; 酒石酸钠对 SDBS 清洗的增效能力为 4 种钠盐中最强, 增效机制与 SDS 一致.

临界胶束浓度与表面张力变化的关系密切^[22,37], 为研究添加钠盐后, 表面活性剂的表面张力与清洗效果的关系, 用表面张力仪进行表面张力的测定. 如图 4 所示, SDBS 溶液的表面张力在钠盐加入后降低, 在临界胶束浓度 (CMC) 时出现最小值. 电解质能够降低定向离子基团间的排斥作用, 使离子强度增加, 表面层排列更紧密, 降低表面张力^[23,34,38,39]. 在盐的作用下, 溶液的表面张力降低,

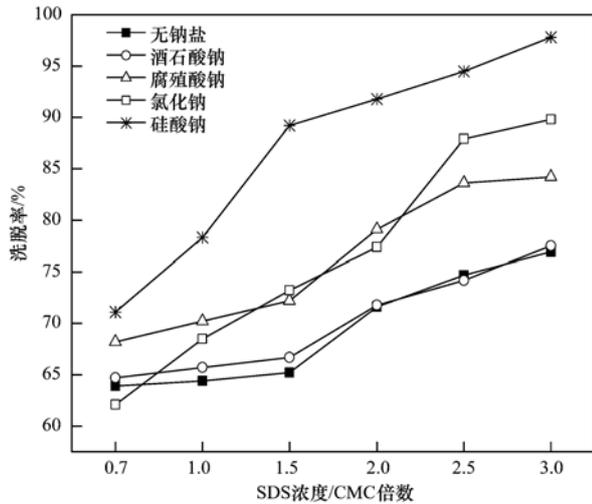


图2 钠盐对 SDS 清洗煤油污染土壤的增效作用

Fig. 2 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with SDS

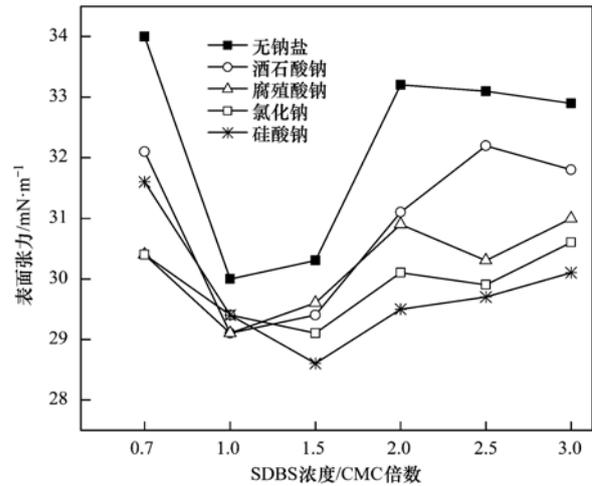


图4 添加钠盐后的 SDBS 的表面张力变化

Fig. 4 Surface tension variations of SDBS in the presence of sodium salt

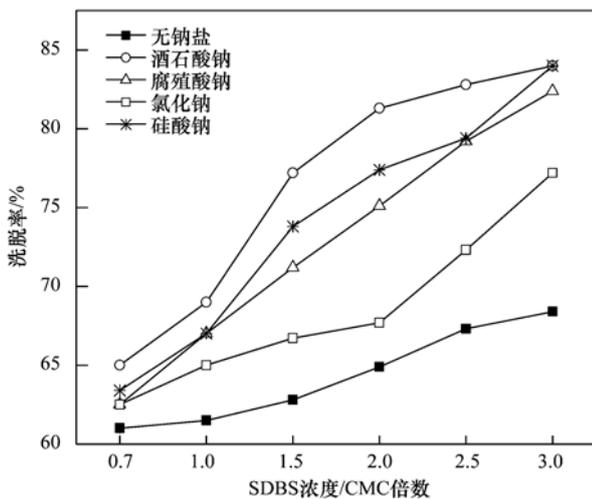


图3 钠盐对 SDBS 清洗煤油污染土壤的增效作用

Fig. 3 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with SDBS

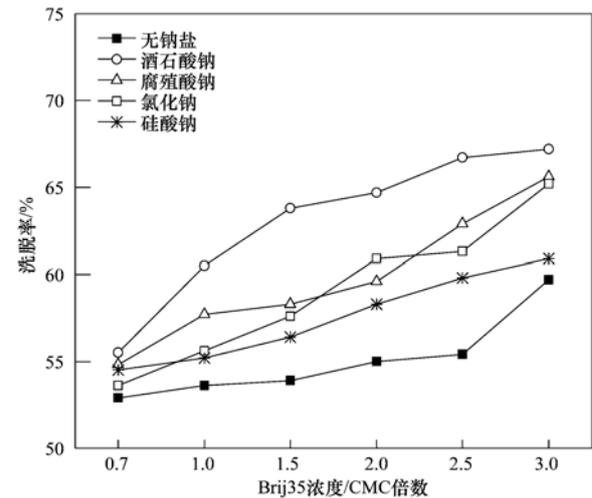


图5 钠盐对 Brij35 清洗煤油污染土壤的增效作用

Fig. 5 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with Brij35

对应的洗脱率增大,洗脱效果的增强归因于油污被“卷离”及在水相中的“增溶”作用^[12]。图4中在浓度为1.5倍CMC时加入硅酸钠,表面张力存在一个低值,对应图3,此浓度下的洗脱率增加速度最快。

2.2 钠盐对非离子型表面活性剂清洗的增效作用

2.2.1 钠盐对 Brij35 清洗的增效作用

经测定,Brij35的CMC为 $0.066 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,是非离子表面活性剂中CMC较低的一种^[40]。图5显示,不同类型钠盐对Brij35的增效作用存在差异,Brij35溶液浓度大于CMC浓度时,添加助剂钠盐,煤油洗脱率显著提高。其中,酒石酸钠对Brij35的增效作用最为明显;当浓度为CMC时,添加酒石酸钠后的

强化洗脱效果与浓度为3倍CMC的Brij35溶液的效果相同;腐殖酸钠的增效作用次之,且效果随着Brij35浓度的增大愈明显。腐殖酸钠能降低土壤中污染物的生物有害性,有利于土质改良,在污染农田土壤的清洗修复中有良好前景;硅酸钠的增效作用优于氯化钠。

2.2.2 钠盐对 TX-100 清洗的增效作用

经测定,TX-100的CMC为 $0.17 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,高于Brij35及Tw-80。图6显示,TX-100对煤油污染土壤的清洗效果随着浓度的增大而增强。支银芳等^[38]在研究中发现,影响TX-100作用最大的因素为溶液的浓度,实际应用中要达到较好的效果需要使用大量的TX-100,易发生试剂沉淀导致溶液中溶

质的浓度降低,有效性减弱,且被土壤吸附,造成二次污染,需研究在保证清洗效果的前提下减少用量.

实验证明,添加不同类型的等量助剂钠盐, TX-100 清洗土壤可增效 10% ~ 35%. 在 TX-100 溶液浓度为 0.7 倍 CMC 时,分别添加酒石酸钠和腐殖酸钠后的清洗效果与 2.5 倍 CMC 浓度下 TX-100 纯溶液的清洗效果相同,但强化清洗时 TX-100 用量减少 2/3.

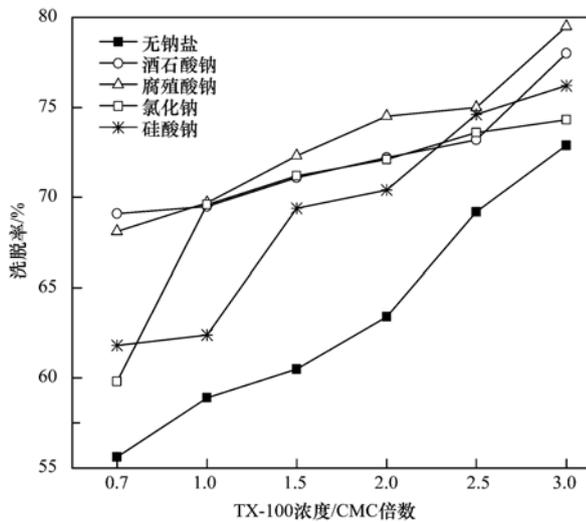


图 6 钠盐对 TX-100 清洗煤油污染土壤的增效
Fig. 6 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with TX-100

2.2.3 钠盐对 Tw-80 清洗的增效作用

从图 7 可以看出,钠盐可防止洗脱分离后的煤油重新被土壤吸附. 氯化钠和酒石酸钠对土壤中的煤油有明显的“增溶”作用,一方面,氯化钠在 Tw-80 溶液中发生“盐析”作用,使 Tw-80 在水中的浊点降低可增加表面活性剂的有效浓度,溶解度下降,促使 Tw-80 进入油相,且破坏煤油分子和 Tw-80 氧原子所形成的氢键. 硅酸钠的增效作用随着浓度的增大而增强,酒石酸钠和氯化钠的强化效应在低浓度时效果更明显. 此外,酒石酸钠和腐殖酸钠的有机基团可使活性剂胶团膨大,为煤油提供“增溶”空间^[23,35,38,41];但腐殖酸钠的作用不显著.

图 8 所示,在 Tw-80 溶液加入钠盐,与离子型表面活性剂不同,因“盐溶”作用导致 Tw-80 表面张力增大,加入氯化钠后,表面张力的最小值仍在浓度为 CMC 处出现. 表面张力值的变化不大,但盐使其更趋于形成胶束,洗脱率增加的幅度大^[22]. 电解质对其 CMC 值的影响,主要是通过疏水基的“盐析”或“盐溶”作用. 加盐可使溶解度增大,“盐溶”效应

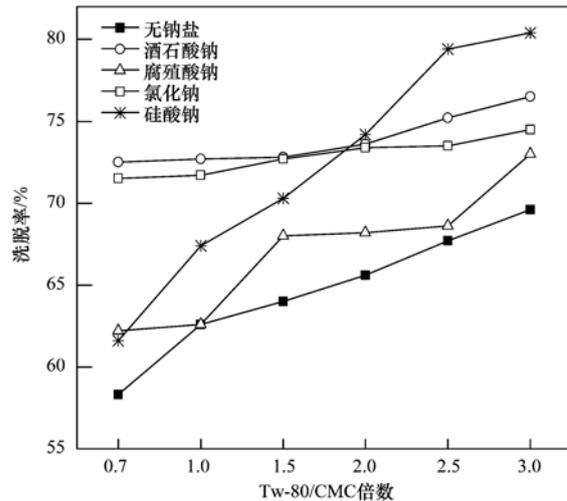


图 7 钠盐对 Tw-80 清洗煤油污染土壤的增效作用
Fig. 7 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with Tw-80

使 CMC 值增加,如加入酒石酸钠及硅酸钠、腐殖酸钠;反之,“盐析”效应则使 CMC 值减小.

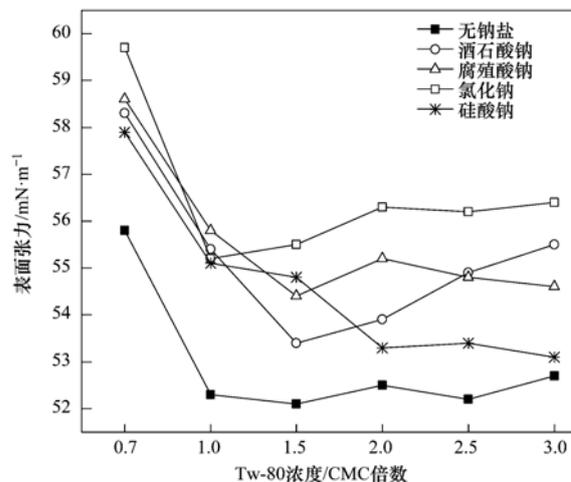


图 8 添加钠盐后的 Tw-80 的表面张力变化
Fig. 8 Surface tension variations of Tw-80 in the presence of sodium salt

2.3 生物表面活性剂——皂苷对煤油污染土壤的增效清洗作用

如图 9 所示,氯化钠、酒石酸钠对皂苷清洗煤油污染土壤增效作用不明显,硅酸钠和腐殖酸钠的效果相当. 腐殖酸钠是土壤有机质的主要组成部分,对皂苷溶液的强化增效的作用明显,能降低土壤中的重金属的生物危害性,是一种理想的生态肥料和土壤改良剂^[42]. 与皂苷溶液联用,不仅在减少皂苷用量的前提下仍达到较好的修复效果,避免产生二次污染,还能改善修复后土壤土质^[41].

为研究钠盐对皂苷表面张力的影响及作用机

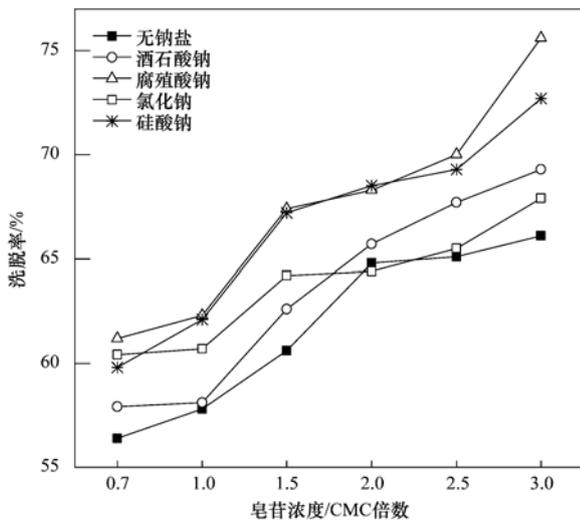


图9 钠盐对皂苷清洗煤油污染土壤的增效作用
Fig. 9 Enhancement of sodium salt on kerosene contaminated soil washing with saponin

制,添加钠盐后测定表面张力. 从图9看出,向皂苷溶液中添加任何类型的钠盐溶液均能改善清洗效果,与一般的非离子型表面活性剂相似,“盐析”和“盐溶”作用,可以起到促进煤油“增溶”的效果. 加入4种钠盐后,测定对应的表面张力,结果如图10. 可见钠盐的添加,增加了溶液中的电解质的量,表面张力增大,但最小值仍在溶液为CMC处出现.

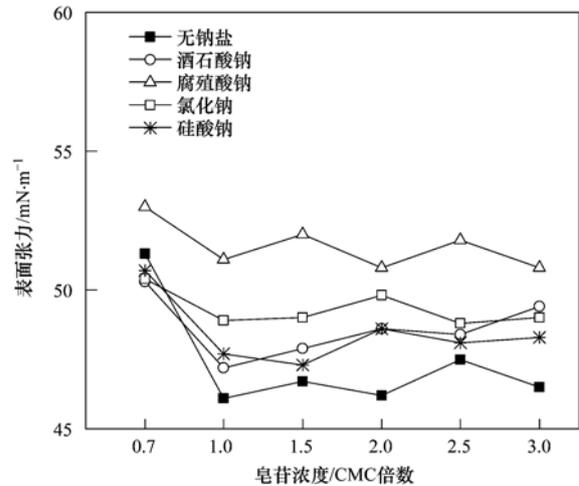


图10 添加钠盐后的皂苷溶液的表面张力变化
Fig. 10 Surface tension variations of saponin in the presence of sodium salt

2.4 土壤在煤油污染和清洗前后的接触角测定

未受煤油污染土壤的平均接触角为6.21°,污染土壤(含油量为20%)接触角平均值为31.39°,污染后接触角增大了25.18°,亲水性发生改变. 6个浓度Tw-80溶液清洗后的土壤接触角如表3所示,清洗后接触角较清洗前降低,随着溶液浓度的增高洗脱率增大,接触角减小. 其它表面活性剂清洗土壤前后接触角测定有类似结果,表明表面活性剂清洗煤油污染土壤,对土壤的亲水性起到很好的恢复作用.

表3 Tw-80清洗后的土壤接触角变化

Table 3 Contact angle variations of kerosene contaminated soil washing with Tw-80

溶液浓度(CMC倍数)	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
接触角/(°)	12.47	11.58	10.94	10.05	9.31	8.80

3 结论

(1)钠盐的加入对十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、聚氧乙烯月桂醚(Brij35)、吐温-80(Tw-80)、曲拉通X-100(TX-100)、皂苷溶液清洗均有增效作用. 钠盐对离子型表面活性剂的增效作用更为明显,其中硅酸钠对SDS清洗效果的改善作用最大,酒石酸钠对SDBS清洗的增效作用最明显;对于非离子表面活性剂而言,不同种钠盐对TX-100清洗的增效作用差别不大;酒石酸钠和氯化钠对Tw-80增效最好;酒石酸钠对Brij35的增效作用随Brij35浓度增加速度最快;硅酸钠和腐殖酸钠对皂苷的增效作用明显,由于腐殖酸钠可起到改良土质等作用,皂苷和腐殖酸钠“联用”较为合适.

(2)添加硅酸钠、氯化钠、腐殖酸钠、酒石酸钠对SDBS的表面张力的影响最大. 在盐的作用下,溶液的表面张力降低,对应的洗脱率增大,洗脱效果改善归因于油污“卷离”、煤油在活性剂中的“增溶”及抗煤油“再吸附”作用;添加钠盐后,Tw-80溶液、皂苷溶液的表面张力值均增大,洗脱效果的增强归因于对表面活性剂的“抗沉淀”及“盐析”作用.

(3)煤油污染土壤,使土壤颗粒亲水性发生改变,表现为接触角增大,土壤清洗后的接触角均变小,且随着清洗表面活性剂浓度的增大,洗脱率增大,接触角减小,修复效果越好.

参考文献:

[1] Pinedo J, Lijzen J P A, Ibanez R, et al. Human risk assessment of contaminated soils by oil products: total TPH content versus fraction approach [J]. Human and Ecological Risk Assessment,

- 2014, **20**(5): 1231-1248.
- [2] 魏颖, 潘峰, 王鹏波, 等. 航空煤油精制工艺的产污对比及防治措施[J]. 化工环保, 2014, **34**(3): 276-280.
- [3] Laha S, Tansel B, Ussawarukulchai A. Surfactant-soil interactions during surfactant-amended remediation of contaminated soils by hydrophobic organic compounds: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 95-100.
- [4] 杨明星, 杨悦锁, 杜新强, 等. 石油污染地下水有机污染组分特征及其环境指示效应[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 1025-1032.
- [5] McKnight U S, Finkel M. A system dynamics model for the screening-level long-term assessment of human health risks at contaminated sites [J]. *Environment Modelling & Software*, 2013, **40**(2): 35-50.
- [6] 张丙印, 王昆泰, 师瑞峰. 土壤中可挥发污染物抽气清除法的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 544-548.
- [7] 李玮. 土壤轻质油污染的冲洗及抽气去除实验研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2004. 7-10.
- [8] 李晓华, 许嘉琳, 王华东, 等. 污染土壤环境中石油组分迁移特征研究[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(S1): 54-58.
- [9] 张晓勤, 王颖, 于书庆, 等. 接触煤油作业工人健康状况分析[J]. 职业与健康, 1989, **21**(1): 42-43.
- [10] Prasad R, Singh A, Garg R, *et al.* Biomass fuel exposure and respiratory diseases in India [J]. *BioScience Trends*, 2012, **6**(5): 219-228.
- [11] Reed R P, Conradie F M. The epidemiology and clinical features of paraffin (kerosene) poisoning in rural African Children [J]. *Annals of Tropical Paediatrics*, 1997, **17**(1): 49-55.
- [12] García J R, Castillo Y Q, Sánchez V Z R, *et al.* Severe complications due to the parenteral use of kerosene in autolysis intends, a propose of three cases [J]. *Revista Médica Electrónica*, 2013, **35**(5): 538-546.
- [13] 何炜. 汽油和柴油污染土壤通风修复试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007. 41-62.
- [14] 李婷婷, 张玲妍, 郭书海, 等. 完全对称电场对电动-微生物修复石油污染土壤的影响[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(10): 1262-1267.
- [15] 籍国东, 周国辉. 异位化学淋洗修复石油类污染土壤[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, **43**(6): 863-871.
- [16] Volkering F, Breure A M, Van Andel J G, *et al.* Influence of nonionic surfactants on bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(5): 1699-1705.
- [17] 高士祥, 高松亭, 韩朔睽, 等. 表面活性剂清洗法在污染土壤修复中的应用[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 84-86.
- [18] Rahman K S M, Banat I M, Thahira J, *et al.* Bioremediation of gasoline contaminated soil by a bacterial consortium amended with poultry litter, coir pith, and rhamnolipid biosurfactant [J]. *Bioresource Technology*, 2002, **81**(1): 25-32.
- [19] Lee H, Lee Y. Feasibility analysis of the remediation of fuel oil-contaminated soil and groundwater around the railroad station of Y city, Korea with surfactant-aided soil flushing [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2013, **8**(3): 461-472.
- [20] Khalladi R, Benhabiles O, Bentahar F, *et al.* Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **164**(2-3): 1179-1184.
- [21] 朱利中, 冯少良. 混合表面活性剂对多环芳烃的增溶作用及机理[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 774-778.
- [22] 蒋庆哲, 宋昭崢, 赵密福, 等. 表面活性剂科学与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012. 121-143.
- [23] 赵国玺, 朱步瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003. 47.
- [24] 邹小勇, 赵如松, 慕朝, 等. 含沥青质模拟油/水乳液稳定性与界面性质关系 I 界面张力和 Zeta 电位的影响[J]. 精细化工, 2013, **30**(2): 193-197.
- [25] 冯少良. 混合表面活性剂对多环芳烃的增溶作用机理及影响因素[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 35-38.
- [26] 卢媛, 马小东, 孙红文, 等. 表面活性剂清洗处理重度石油污染土壤[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(8): 1483-1487.
- [27] 梁莹, 朱琨, 卢晓岩, 等. 腐殖酸钠对柴油污染土壤的增溶解吸作用研究[J]. 兰州交通大学学报, 2005, **24**(1): 62-64.
- [28] 刘霞, 王建涛, 张萌, 等. 螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1591-1597.
- [29] 贾建丽. 石油污染土壤微生物学特征与生物修复效应研究[D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2005. 3-5.
- [30] 卢媛. 表面活性剂清洗处理重度石油污染土壤[D]. 天津: 南开大学, 2009. 27-29.
- [31] Morales-Caselles C, Riba I, Sarasquete G, *et al.* The application of a weight of evidence approach to compare the quality of coastal sediments affected by acute (Prestige 2002) and chronic (Bay of Algeiras) oil spills [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 394-402.
- [32] 李果, 毛华军, 巩宗强, 等. 几种表面活性剂对柴油及多环芳烃的增溶作用[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(7): 775-780.
- [33] 陈坚, 华兆哲, 伦世仪. 生物表面活性剂在环境生物工程中的应用[J]. 环境科学, 1996, **17**(4): 86-90.
- [34] 强婧, 尹华, 彭辉, 等. 铜绿假单胞菌 S6 分泌的生物表面活性剂特性[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 102-110.
- [35] 施周, Chosh M M. 表面活性剂溶液中多氯联苯溶解的特性[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(5): 456-459.
- [36] 杨建, 陈家军, 卢毅. 表面活性剂去除土壤和地下水中 LNAPLs 作用机制研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2153-2159.
- [37] 马静, 杨植文, 刘新星, 等. 含 Brij35 可聚合型非离子表面活性剂的合成与表征[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, **36**(7): 102-105.
- [38] 支银芳, 陈家军, 杨官光, 等. 不同表面活性剂溶液冲洗油污土壤的对比试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(2): 354-358.
- [39] 熊雪丽, 占新华, 周立祥. 不同洗脱剂对有机氯农药污染场地土壤修复效果比较[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(1): 348-354.
- [40] 孙志斌, 张禹负, 李彩云, 等. 阴离子与非离子表面活性剂混合体系的胶束性质[J]. 石油勘探与开发, 2004, **31**(3): 129-132.
- [41] 任学军, 杜彬, 任艳军, 等. 腐殖酸钠对镉胁迫小白菜生物效应的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(30): 16888-16890.
- [42] 李隋, 赵勇胜, 徐巍, 等. 吐温 80 对硝基苯的增溶作用和无机电解质作用机理研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 921-924.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行